

実験水路で発生させた土石流の特性に関する考察

関西電力(株) 正員○中村博久, 正員吉川 太, 正員副田悦生
 関電興業(株) 正員松下 寛
 (株)新日本技術コンサルタント 正員大槻英樹

1. はじめに

山間部の急傾斜地や扇状地への構造物立地に際しては、土石流災害が危惧され電力施設計画段階において対土石流安全性の検討を実施し、設計・施工へと反映させなければならない。対象となる地点の地形形状も考慮した3次元的な土石流の流下・堆積現象を評価するためには、模型実験による検討が有効な手段となる。この時、境界条件として発生土石流の特性を実験水路内でコントロールする必要があり設定する土砂水理条件とその結果発生する土石流諸元の関係を把握しておかなければならない。

本報告は、土石流発生渓流を想定した2次元水路において、種々の条件下で発生させた土石流の諸元を観測し模型実験条件の設定とその評価法に関する考察を行ったものである。

2. 基礎式

江頭・芦田らによると、土石流の一次元支配方程式は以下の¹⁾ように表される。
 水と砂礫の混合物および流動砂礫の体積保存則 ;

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial v h}{\partial x} = -\frac{D}{C_*} \quad (1) \text{式}$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial C v h}{\partial x} = -D \quad (2) \text{式}$$

運動量保存則 ;

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta - g \cos \theta \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{(\sigma/\rho-1)h}{(\sigma/\rho-1)C+1} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial h} \right\} + \frac{(\sigma/\rho-1)C g \cos \theta}{(\sigma/\rho-1)C+1} \cdot \mu_k - \frac{1}{\{(\sigma/\rho-1)C+1\}h} f v^2 \quad (3) \text{式}$$

$$\text{河床変動式 ; } \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{D}{C_*} \cos \theta \quad (4) \text{式}$$

$$\text{堆積速度式 ; } D/v = C_* \tan(\theta_c - \theta) \quad (5) \text{式}$$

$$f \text{ は抵抗係数であり, } f = \frac{25}{4} \left(\frac{\kappa_p}{\kappa_v} \right)^{2/3} \left(\frac{1-C}{C} \right)^{2/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad (6) \text{式}$$

$\left(\frac{\kappa_p}{\kappa_v} \right)^{1/3}$ は、粒子および間隙の形状係数比である。

θ_c は、土石流の流下過程において侵食も堆積も起こらない平衡勾配であって、次式で与えられる。

$$\theta_c = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\sigma/\rho-1)C}{(\sigma/\rho-1)C+1} \cdot \mu_k + \frac{f}{\{(\sigma/\rho-1)C+1\}gh} \cdot v^2 \right\} \quad (7) \text{式}$$

ここに、 t は時間、 x は河床に沿う座標、 h は流動深、 v は断面平均流速、 D は実質の堆積速度 ($D < 0$ は侵食の意味)、 C_* は堆積物の粒子濃度、 C は土石流の粒子濃度、 θ は河床面 (x 軸) と水平面との角度 ($\sin^{-1}(-dz_b/dx)$)、 z_b は河床位であり、基準水平面からの高さで定義している。 μ_k は動摩擦係数で (0.8μ 程度)²⁾ μ_s (静摩擦係数) である。

3. 実験方法

実験装置は、長さ4m、幅12cmの土石流発生用矩形水路(水路床は実験砂により粗度付けし、側壁は透明アクリル製で挙動観察が可能である。)と下流の堆積用平面水路(発砲スチロール製)とからなり接続点でそれぞれ独立に勾配を変化出来る構造となっている。

実験は、発生水路勾配20°とし $d_m=1.4\text{mm}$ の混合砂($0.1\text{mm} < d < 10\text{mm}$)を堆積濃度 $C_*=0.65$ で、堆積長 L ・堆積厚 t を変化させて敷き堆積層をほぼ飽和させた後、上流より所定の流量を供給して土石流を発生させ、ビデオカメラと35mmスチルカメラにより先端付近の流速と堆積形状を計測した。なお、土石流濃度 C は採水法により実施した。

4. 実験結果

4-1. 《発生水路内堆積長L・堆積厚 δ と発生土石流濃度Cの関係》

図-1に示す実験結果より次の事が読み取れる。

- ・土石流濃度CはLの増加と共に大きくなり $L=300\text{cm}$ 程度で収束し $C=0.4\sim0.5$ の範囲であった。
- ・堆積厚 δ による系統的影響がみられない。
- ・先端付近の濃度(0秒後)が後続部(15~60秒後)のそれに比べて若干大きな値を示している。この理由としては、土石流流出中に堆積層表面勾配が緩くなっていることが観察され、発生水路勾配を変化させ堆積層表面勾配を一定に保つことで定常的な土石流を発生出来ることを別途確認した。

$d=d_m$, $\rho=1.0$, $(\frac{\rho_s}{\rho_p})^{1/3}=2.5$ として (1)~(5)式をTwo-Step Lax-Wendroff法により土石流先端付近の土石流濃度を解析した結果、実験値と良い一致が見られる。(同図に併記)

4-2. 《土石流流速》

図-2は、(1)~(5)式により求めた土石流先端位置の経時変化の一例である。両者は良く一致している。

4-3. 《土石流堆積形状特性》

図-3に堆積域勾配 θd を $0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ と変化した時の土石流堆積縁の経時変化、水路中心線上の最終堆積時の縦横断面形状の観測を行った結果を示す。

- ・各ケースとも堆積域流入後5~10秒後には先端部が最終到達点まで達し、その後横方向への堆積が始まる。
- ・堆積域の横断面形状は、上流部ではほぼ台形状であるが下流部では土石流の首振り現象や2次浸食により複雑な形状を呈する。
- ・堆積勾配 γ は、 $7.5\sim8.5^\circ$ 程度で θd にあまり影響されない。尚、基礎式により2次元条件下での堆積勾配 γ を求めると場所的な変化が若干伴うが、平均的には 8.5° 程度となる。実験では3次元現象であり、単純に堆積形状の比較は出来ないが2次元解析でもある程度の推定は可能なようである。

5. あとがき

混合砂を用いた実験により発生させた土石流の挙動は、従来均等砂を出発点として検討されてきた支配方程式に $d=d_m$ (平均粒径)を代入することでは説明出来る事を確認した。また、 σ/ρ は清水を用いる場合 $\rho=1.0$ として評価出来るが、実際の土石流では固相から液相への相変化により、液相のみかけの密度が増加することがあると指摘されており、これを再現させるためには、比重の小さな材料を用いる必要がある。別途行った比重 2.2の材料(スラライト)を用いた実験によると堆積の時に水の浸透性が高くその影響により堆積が促進される傾向になり、材料特性の面からも実験検討手法についての考察が必要である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、多大な御指導を受けた京都大学防災研究所芦田・江頭両先生ならび関係諸氏に心より謝意を表する次第である。

参考文献 1). 芦田・江頭・佐々木：斜面崩壊の発生と土石流の流動機構、京都大学防災研究所年報 第30号B-2, PP.507-526.1987 2). 江頭・芦田らの実験による。

設定厚 (cm)	経時変化		
	先端(0秒後)	15~30秒後	30~60秒後
1.0	○	●	◎
2.0	□	■	◼
3.0	△	▲	◈
4.0	◇	◆	◊

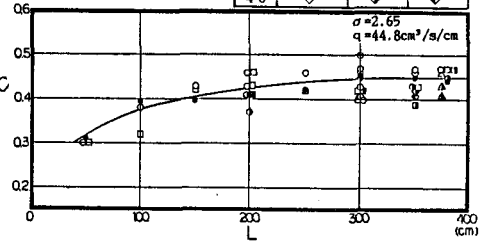


図-1 堆積長(L)と土石流先端付近濃度(C)の関係

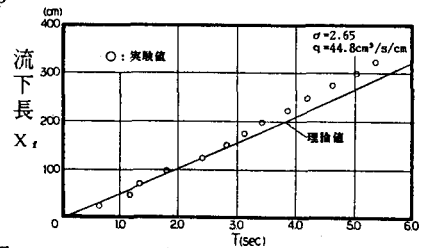


図-2 土石流先端付近経時変化図

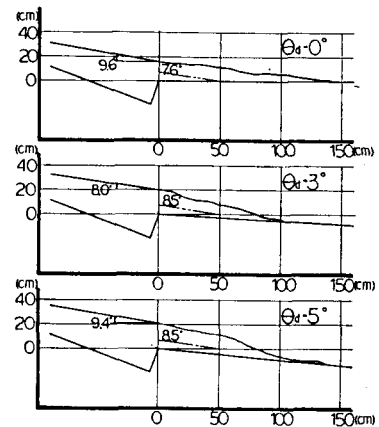


図-3 土石流縦断堆積形状